

## РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ ГОРОДА

Алексеев М. И., Баранов Л. А., Ермолин Ю. А.

## RISK-BASED APPROACH TO EVALUATE THE RELIABILITY OF A CITY SEWER NETWORK

Alexeev M. I., Baranov L. A., Ermolin Y. A.

### Аннотация

**Введение.** В статье обращается внимание на то, что существуют технические объекты, оценка надежности которых с помощью показателей «классической» теории надежности (в частности, вероятностью безотказной работы и/или средней наработкой до отказа) неоднозначна и плохо интерпретируема физически. Примером такого объекта является канализационная сеть города. Рассматривается ситуация, когда результат формального расчета надежности канализационной сети входит в очевидное противоречие с физическим представлением о характере функционирования объекта. Это вызывает необходимость поиска более информативного показателя надежности, специфичного для городской канализационной сети. **Методы.** Исследование основывается на методе декомпозиции и эквивалентирования канализационной сети (МДЭ-метод), разработанном ранее. МДЭ-метод базируется на теории вероятностей, теории надежности и математической статистике. В качестве исходного материала используется база данных, содержащая информацию об отказах и восстановлениях всех элементов сети за предшествующее время. **Результаты.** Мерой надежности городской канализационной сети предлагается считать эксплуатационный риск, представляющий собой относительный объем сточных вод, не доставленный к очистным сооружениям сети вследствие отказов ее элементов за определенное время. Разработана методика количественного определения этого показателя. Показаны его комплексность и информативность «насыщенность». Намечены возможные направления использования показателя «эксплуатационный риск» при разработке стратегии реновации канализационной сети города. **Заключение.** Показатель надежности в виде эксплуатационного риска может быть использован на практике для повышения эффективности функционирования городской канализационной сети.

**Ключевые слова:** канализационная сеть, надежность, эффективность работы, неочищенный сброс, эксплуатационный риск, методика расчета, реновация, принятие решений.

### Abstract

**Introduction.** The authors pay attention to the fact that there exist such technical objects, the reliability evaluation of which — if performed with the use of measures of the “classical” reliability theory (in particular, reliability function and/or mean operating time to failure) — is ambiguous and poorly interpreted physically. A city sewer network can serve as an example of such an object. The authors consider a situation when the result of the formal sewer network reliability analysis comes into conflict with the physical interpretation of object operation. This generates a need for searching for a more informative reliability indicator peculiar to a city sewer network. **Methods.** The research is based on the sewer network decomposition-equivalent method (DEM) developed previously. This method, in turn, is based on the probability theory, reliability theory and mathematical statistics. A database containing the information about all network elements’ failures and restorations over a preceding period, is used as reference material. **Results.** Operational risk is taken as the reliability measure of a city sewer network. It is defined as the relative volume of sewage, not delivered to treatment facilities of the network due to failures of its elements, in a certain time. A procedure for the quantitative calculation of this measure is developed. Its comprehensiveness and informative richness are demonstrated. The article shapes possible ways of using the “operational risk” indicator when developing a city sewer network renovation strategy. **Conclusion.** Operational risk as the reliability measure can be used in practice to improve the performance of a city sewer network.

**Keywords:** sewer network, reliability, performance, sewage discharge, operational risk, calculation procedure, renovation, decision making.

## Введение

Надежность – одно из важнейших качеств любого технического объекта. ГОСТ определяет надежность (*reliability, dependability*) как «свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения...» [7]. В технике надежность объекта оценивается рядом количественных показателей; из них наиболее часто в практических расчетах используют вероятность безотказной работы (*reliability function, survival function*) и среднюю наработку до отказа (*mean operating time to failure*). Физический смысл этих показателей ясен уже из названий, и их однозначная трактовка при оценке надежности многих технических объектов каких-либо затруднений не вызывает.

Существуют, однако, объекты, при описании надежности которых упомянутые показатели нуждаются, как минимум, в дополнительном осмыслении. Примером такого технического объекта является канализационная сеть города.

Канализационная сеть — объект, цель и назначение которого состоит в сборе и отведении **всей** (выделено мной) сточной воды, поступающей на его входы, к очистным сооружениям. Сеть — это система конструктивно и технологически связанных между собой элементов (каналов, коллекторов, насосных станций), каждый из которых транспортирует воду только в одном направлении. В процессе функционирования любой (*i*-й) элемент сети под воздействием потока отказов с интенсивностью  $\lambda_i$ , определяющей вероятность его безотказной работы, выходит из строя, т. е. переходит в неработоспособное состояние, а вода, транспортируемая по нему, не доставляется к устройствам очистки, а сбрасывается «на рельеф».

Возникает вопрос: переводит ли отказ какого-либо элемента всю канализационную сеть как единый объект в неработоспособное состояние? Для ответа на этот вопрос опять обратимся к ГОСТу, где неработоспособное состояние определяется как «состояние объекта, при котором значения **всех** параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации» [7].

Сопоставление этого определения с ситуацией, рассмотренной чуть выше, приводит к положительному ответу на сформулированный вопрос: отказ любого элемента канализационной сети переводит ее в неработоспособное состояние. Ответ неожиданный, плохо согласующийся как с практикой, так и с бытовым представлением о характере функционирования канализационной сети города. А, например, вполне корректная с точки зрения «классической» теории надежности фраза «Вероятность безотказной работы канализационной сети в течение года равна (цифра)» во многом теряет смысл в силу неоднозначности ее физической интерпретации.

В связи с этим встает вопрос о выборе более информативной и имеющей ясную физическую трактовку количественной меры надежности городской канализационной сети.

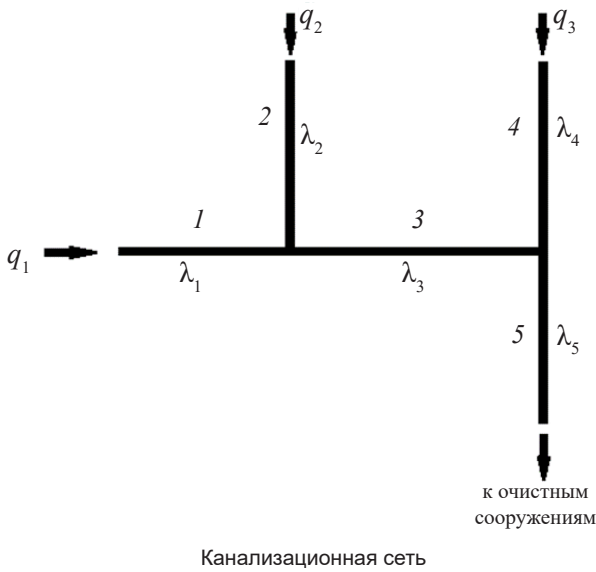
В качестве одного из таких показателей может быть принят эксплуатационный риск. Самое общее определение этого показателя дается в [6]: «Риск — это сочетание вероятности и последствий наступления неблагоприятных событий». В зависимости от того, в какой сфере деятельности применяется этот термин, слова «последствие» и «неблагоприятное событие» в приведенной дефиниции «наполняются» различным физическим смыслом.

## Методы и материалы

Для адаптации понятия эксплуатационного риска к условиям рассматриваемой постановки задачи проанализируем процесс водоотведения сточных вод канализационной сетью, показанной на рисунке, с точки зрения выполнения ею своих функций. Для наглядности изложения сеть выбрана предельно простой, дающей, однако, возможность пояснить все основные составляющие понятия эксплуатационного риска.

Сеть состоит из пяти однородных элементов (труб); все элементы пронумерованы (1–5). Каждая труба в процессе эксплуатации может выйти из строя под воздействием стационарных потоков отказов с интенсивностями  $\lambda_1–\lambda_5$ . На три входа сети поступают расходы сточной воды  $q_1–q_2$ . Назначение сети состоит в проведении всей воды, поступающей на ее входы, к очистным сооружениям.

В качестве «неблагоприятного события» в определении риска (см. выше) будем рассматривать



Канализационная сеть

отказ (выход из строя) какого-либо элемента сети, а количественной меры его «последствия» — объем сброса неочищенной сточной воды, транспортируемой по нему, на рельеф. Из рисунка видно, что выход из строя элемента 1 приводит за время  $T$  к стоку, не доставленному к очистным сооружениям, в объеме  $q_1 T$ ; обозначим это так:  $1 \rightarrow q_1 T$ . Аналогично по всем другим элементам сети:  $2 \rightarrow q_2 T$ ;  $3 \rightarrow (q_1 + q_2) T$ ;  $4 \rightarrow q_3 T$ ;  $5 \rightarrow (q_1 + q_2 + q_3) T$ . Видно, что во всех случаях (кроме последнего) канализационная сеть выполняет свою функцию, но лишь частично. Таким образом, речь идет о количественном определении степени эффективности функционирования сети, напрямую связанной с ее надежностью. Заметим, что объем неочищенного сброса  $\Delta Q$  зависит от расходов воды на входах сети, характеристик надежности каждого из элементов ( $\lambda$ ) и места его расположения в структуре объекта. В этом смысле «последствия неблагоприятного события» для конкретного элемента сети имеют как бы свой «вес». Видно, например, что лишь выход из строя элемента 5 приводит, в соответствии с ГОСТ [7], к полностью неработоспособной сети, поскольку **вся** сточная вода не доставляется к очистным сооружениям.

Абсолютный объем неочищенного сброса  $\Delta Q$  сам по себе мало что говорит об эффективности (и, следовательно, надежности) работы канализационной сети. Более информативной является величина, показывающая, какую часть от общего количества сточной воды  $Q$ , поступающей на ее

входы за время  $T$ , этот объем составляет. Обозначим

$$R = \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (1)$$

назовем  $R$  мерой эксплуатационного риска (или просто риском). Видно, что  $R$  может принимать значения только в диапазоне  $0 \leq R \leq 1$ . При этом  $R = 0$  соответствует абсолютно надежной, а  $R = 1$  — полностью неработоспособной канализационной сети. Промежуточные значения  $R$  количественно оценивают степень эффективности функционирования (степень надежности) объекта.

Методика расчета  $R$  предложена в [9] и подробно разработана в публикациях [11–14]. Она представляет собой рекуррентную процедуру пошагового преобразования схемы канализационной сети города путем выделения на ней структурообразующих элементов [3] с последующим их эквивалентированием, названную авторами методом декомпозиции и эквивалентирования (МДЭ-методом) [1, 11, 15]. В результате вся сеть оказывается представленной одним виртуальным фиктивным каналом, для которого определение эксплуатационного риска трудностей не вызывает. МДЭ-метод легко алгоритмизируется и хорошо приспособлен для применения ЭВМ.

Для подтверждения работоспособности методики вернемся к сети на рисунке и рассчитаем для нее значение  $R$ . При этом дополнительно учтем свойство ремонтпригодности [7] изображенной сети, заключающееся в том, что каждый отказавший ( $i$ -й) элемент восстанавливается с известной интенсивностью  $\mu_i$ , после чего продолжает выполнять свои функции. Применение МДЭ-метода в отношении сети, показанной на рисунке, приводит к следующему выражению для эксплуатационного риска:

$$R = \frac{(\rho_1 + \rho_3 + \rho_5)q_1 + (\rho_2 + \rho_3 + \rho_5)q_2 + (\rho_4 + \rho_5)q_3}{q_1 + q_2 + q_3}, \quad (2)$$

где введена безразмерная величина

$$\rho_i = \lambda_i / \mu_i. \quad (3)$$

Как видно из рассмотренного примера, риск  $R$  как количественная мера надежности канализационной сети позволяет учитывать:

- а) топологию объекта;
- б) техническое состояние (в смысле надежности) каждого элемента сети ( $\lambda$ );

в) гидравлическую нагрузку на сеть (расходы воды  $q$  по всем входам);

г) технические возможности эксплуатирующей организации по ремонту структурных элементов сети, вышедших из строя ( $\mu$ ).

### Результаты исследования и обсуждение

Такая информационная «насыщенность» этого показателя дает возможность продуктивно использовать его как при оценке текущего состояния городской канализационной сети, так и при планировании организационно-технических мероприятий по повышению эффективности ее функционирования, например, при планировании реноваций и замен отдельных элементов объекта.

Укрупненный алгоритм использования  $R$  для этих целей может выглядеть следующим образом:

1. Интервал изменения  $R$  ( $0 \leq R \leq 1$ ) разбивается на  $n$  непересекающихся диапазонов, каждому из которых ставится в соответствие определенное состояние сети:

$0 \leq R \leq R_1$ : состояние 1;

$R_1 < R \leq R_2$ : состояние 2;

...

$R_{n-1} < R \leq 1$ : состояние  $n$ .

Каждое состояние характеризуется своим значением экономического, экологического, санитарно-эпидемиологического и социального ущерба, наносимого городу в результате сброса соответствующего объема неочищенного стока на поверхность (см. (1)). Оценка этого ущерба для конкретного населенного пункта, равно как и количество диапазонов  $n$ , — сложная и практически неформализуемая задача. Приемлемое для практики решение подобных задач обычно связывают с корректным применением методов экспертных оценок [5, 8].

2. Периодически используя базы данных с информацией по интенсивностям отказов и продолжительности ремонтов элементов сети — событиям, которые обычно документируются на протяжении многих лет и постоянно пополняются, рассчитывается значение эксплуатационного риска  $R$ , количественно оценивающее текущее состояние объекта (в смысле принятого критерия).

3. По результатам расчетов принимается решение о необходимости реновации канализационной сети. Правило принятия решения может быть таким: если последовательно проводимые

расчеты  $R$  дают значения, принадлежащие «приемлемому» (по ущербу) диапазону, то реновации не требуется; выявление же устойчивой тенденции к увеличению  $R$  свидетельствует о необходимости принятия превентивных организационно-технических мероприятий по реновации сети. Варианты таких мероприятий обычно предлагаются специалистами; выбор наилучшего из них может быть определен при расчете  $R$  для исходных данных, виртуально «обновленных» в соответствии с конкретным вариантом (например,  $\lambda_i$  или  $\mu_i$ ), и принять к реализации тот из них, для которого  $R$  имеет наименьшее значение. Такой подход применим и для учета «старения» элементов сети, когда происходит прогнозируемая деградация характеристик их надежности во времени [1, 2, 4, 10, 12].

В этом смысле можно говорить об использовании понятия риска при разработке стратегии реновации городской канализационной сети.

### Заключение

Таким образом, предложенный в статье комплексный показатель эффективности работы канализационной сети в виде эксплуатационного риска может быть использован не только для косвенной оценки надежности ее текущего состояния, но и при разработке организационно-технических мероприятий как по краткосрочной, так и долгосрочной реновации объекта. Следует, однако, иметь в виду, что МДЭ-метод численного расчета риска применим лишь в отношении строго древовидных структур, характерных, впрочем, для большинства городских канализационных сетей.

### Литература

1. Алексеев, М. И., Баранов, Л. А. и Ермолин, Ю. А. (2019). Приближенная аналитическая оценка показателей надежности стареющих объектов ВКХ. Вода и экология: проблемы и решения, № 3 (79), сс. 3–8. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.3-8.
2. Алексеев, М. И. и Ермолин, Ю. А. (2004). Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции. Водоснабжение и санитарная техника, № 6, сс. 21–24.
3. Алексеев, М. И. и Ермолин, Ю. А. (2015). Надежность сетей и сооружений систем водоотведения. М.: Издательство АСВ, 200 с.
4. Баранов, Л. А. и Ермолин, Ю. А. (2017). Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов. Надежность, Т. 17, № 4, сс. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.

5. Бешелев, С. Д. и Гурвич, Ф. Г. (1980). Математико-статистические методы экспертных оценок. 2-е изд. М.: Статистика, 263 с.

6. Википедия (2020). Риск. [online] Доступно по ссылке: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B8%D1%81%D0%BA> [Дата обращения: 15.04.2020].

7. Государственный комитет СССР по стандартам (1990). ГОСТ 27002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 35 с.

8. Евланов, Л. Г. (1976). Принятие решений в условиях неопределенности. М.: ИУНХ, 196 с.

9. Ермолин, Ю. А. и Алексеев, М. И. (2000). Оценка потенциального ущерба, связанного с ненадежностью канализационной сети. Водоснабжение и санитарная техника, № 2, сс. 30–32.

10. Ермолин, Ю. А. и Алексеев, М. И. (2002). О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации. Водоснабжение и санитарная техника, № 9, сс. 2–4.

11. Ермолин, Ю. А. и Алексеев, М. И. (2012). Метод декомпозиции и эквивалентирования канализационной сети. Водоснабжение и санитарная техника, № 11, сс. 51–57.

12. Ермолин, Ю. А. и Алексеев, М. И. (2016). Учет «старения» объекта при оценке его надежности. Водоснабжение и санитарная техника, № 5, сс. 68–71.

13. Ермолин, Ю. А. и Алексеев, М. И. (2018). Мера надежности канализационной сети. Вода и экология: проблемы и решения, № 2, сс. 51–58. DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.2.51–58.

14. Ermolin, Y. A. (2001). Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures. *Urban Water*, Vol. 3, Issue 4, pp. 271–276. DOI: 10.1016/S1462-0758(01)00034-6.

15. Ermolin, Y. (2009). Reliability estimation of urban wastewater disposal networks. In: Hayworth, G. I. (ed.) *Reliability Engineering Advances*. New York: Nova Science Publishers, Inc., pp. 379–397.

## References

1. Alexeev, M. I., Baranov, L. A. and Ermolin, Y. A. (2019). Approximate analytical estimate of reliability indices for ageing facilities of water supply and sewer systems. *Water and Ecology*, No. 3 (79), pp. 3–8. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.3-8.

2. Alexeev, M. I. and Ermolin, Yu. A. (2004). The use of reliability evaluation of the aging sewerage networks for their reconstruction. *Water Supply and Sanitary Technique*, Vol. 6, pp. 21–24.

3. Alexeev, M. I. and Ermolin, Y. A. (2015). Reliability of networks and structures of water disposal systems. Moscow: Izdatelstvo ASV, 200 p.

4. Baranov, L. A. and Yermolin, Yu. A. (2017). Dependability of objects with non-stationary failure rate. *Dependability*, Vol. 17, No. 4, pp. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.

5. Beshelev, S. D. and Gurvich, F. G. (1980). Mathematical and statistical methods in expert estimation. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Statistika, 263 p.

6. Wikipedia (2020). Risk. [online] Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B8%D1%81%D0%BA> [Date accessed 15.04.2020].

7. State Committee of the USSR for Standards (1990). State Standard GOST 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions. Moscow: Publishing House of Standards, 35 p.

8. Yevlanov, L. G. (1976). Decision-making in uncertain conditions. Moscow: Institute of National Economy Management, 196 p.

9. Ermolin, Y. A. and Alexeev, M. I. (2000). Estimation of potential damage associated with unreliability of a sewer network. *Water Supply and Sanitary Technique*, Vol. 2, pp. 30–32.

10. Ermolin, Y. A. and Alexeev, M. I. (2002). On a methodology for studying the reliability of ageing elements of water supply and disposal systems. *Water Supply and Sanitary Technique*, Vol. 9, pp. 2–4.

11. Yermolin, Yu. A. and Alexeyev, M. I. (2012). The method of sewer net segmentation and equivalenting. *Water Supply and Sanitary Technique*, Vol. 11, pp. 51–57.

12. Ermolin, I. A. and Alexeev, M. I. (2016). Consideration of object ageing in estimating its reliability. *Water Supply and Sanitary Technique*, Vol. 5, pp. 68–71.

13. Ermolin, Y. A. and Alexeev, M. I. (2018). Reliability measure of a sewer network. *Water and Ecology*, No. 2, pp. 51–58. DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.2.51–58.

14. Ermolin, Y. A. (2001). Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures. *Urban Water*, Vol. 3, Issue 4, pp. 271–276. DOI: 10.1016/S1462-0758(01)00034-6.

15. Ermolin, Y. (2009). Reliability estimation of urban wastewater disposal networks. In: Hayworth, G. I. (ed.) *Reliability Engineering Advances*. New York: Nova Science Publishers, Inc., pp. 379–397.

## Авторы

**Алексеев Михаил Иванович**, д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: m.i.alexeev@mail.ru

**Баранов Леонид Аврамович**, д-р техн. наук, профессор Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия  
E-mail: baranov.miiit@gmail.com

**Ермолин Юрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия  
E-mail: ermolin.y@yandex.ru

## Authors

**Alexeev Mickail Ivanovich**, Dr. of Engineering, Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: m.i.alexeev@mail.ru

**Baranov Leonid Avramovich**, Dr. of Engineering, Professor Russian University of Transport, Moscow, Russia  
E-mail: baranov.miiit@gmail.com

**Ermolin Yuri Alexandrovich**, Dr. of Engineering, Professor Russian University of Transport, Moscow, Russia  
E-mail: ermolin.y@yandex.ru